

## 宇宙機構造技術の研究

## Researches on Space Structural Technology

## 複合接着構造の破壊力学特性の温度依存性評価

## Temperature-dependent Fracture Performance for Multiphase Bond Structures

総合技術研究本部・システム評価技術グループ 何 建梅、下田 孝幸

Institute of Space Technology and Aeronautics, Space Systems Evaluation Engineering Group

Jianmei HE, Takayuki SHIMODA

## Abstract

Adhesively-bonded structure between advanced CFRP composites and aluminum metal (Al) plays an important role in the development of a light-weight space structure. Accurately understanding the temperature-dependent fracture behaviors of such multiphase bond structures is very important from design safety and durability viewpoints. Substantial thermal stress-strain, which is caused by the mismatch of thermal expansion ratios between adhesives, CFRP composites and aluminum metal could lead to the strength deterioration of such multiphase bond structures over a wide temperature range. In this study, temperature-dependent Mode-II fracture performance of adhesively-bonded joints between CFRP and Al was experimentally investigated using a candidate structure adhesive film named AF163-2K.

## 1. はじめに

軽量化及び輸送コストの大幅な低減を目指す宇宙機システムの研究開発において、繊維強化プラスチック先進複合材料の大幅な応用は大きな役割を果たす。特に軽量化を図るためのアルミ金属ライナ付き先進複合材CFRP製液体推進剤タンクの研究開発は重要なキー技術となっている。液体推進剤タンクの運用温度範囲（常温～-150℃より低い極低温度）において接着構造の各構成部材間に存在する熱線膨張率の相異で接着界面に大きな熱歪・応力が発生し、タンク接着構造の大幅な強度低下につながることを考えられる。それで接着剤を含むCFRP/アルミ間接着構造における構成部材・接着構造の強度や破壊力学特性の温度依存性を正確に把握することはタンク設計上の成立性や運用上の安全信頼性、耐久性に必須である。本研究は、常温から極低温度までの温度範囲でCFRP/アルミ間接着構造の破壊力学特性の温度依存性を実験的に評価する目的とした。

平成16年度に総合技術研究本部・システム評価技術グループでは、CFRP/アルミ間接着構造のせん断モード破壊特性を評価する実験を実施し、得られた実験結果と平成15年度で実施したCFRP/アルミ間接着構造引張モード評価試験の結果と共に、極低温度でCFRP/アルミ間接着構造の剥離における亀裂進展メカニズムの解明と評価を行った。

## 2. 評価試験について

常温と極低温度の-163℃（液体天然ガスLNG温度）に設定し、極低温でも優れた力学特性を持つフィルム接着剤AF163-2Kを用いてCFRP/アルミ間接着構造のせん断モード破壊力学特性の温度依存性を評価した。被着材の相異で直接CFRP/アルミ間接着構造（アルミ-フィルム接着剤-CFRP）から単純せん断破壊モードを得られないため、アルミ接着構造（アルミ-フィルム接着剤-アルミ）

とCFRP接着構造(CFRP-フィルム接着剤-CFRP)別の評価試験を実施した。JIS規格試験法(JIS K 7086)に基づき、図1に示すようなイメージでENF (End-Notched Flexure) 試験用供試体を製作した。またアルミ接着構造とCFRP接着構造別のENF供試体寸法を表1に示している。図2に二つの接着構造に対する評価試験の写真イメージを示す。

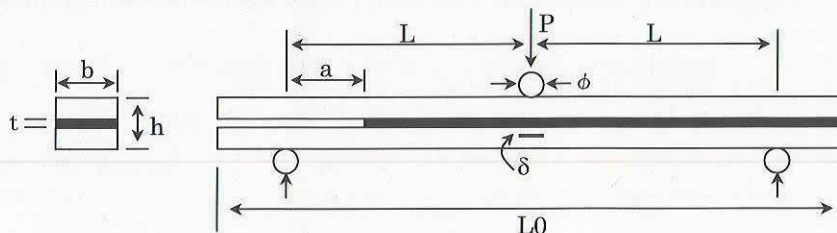


Fig.1 Mode-II fracture strength measurement for adhesively-bonded joints

Table 1 Specimen sizes for Al-AF163-2K and CFRP-AF163-2K bonds

寸法項目	アルミ接着構造 ENF 供試体寸法 (mm)	CFRP 接着構造 ENF 供試体寸法 (mm)
L	50.0	50.0
L0	-----	140.0±0.5
A	25.0	20.0
B	16.0	20.0
T	0.2	0.2
H	19.0	3.2

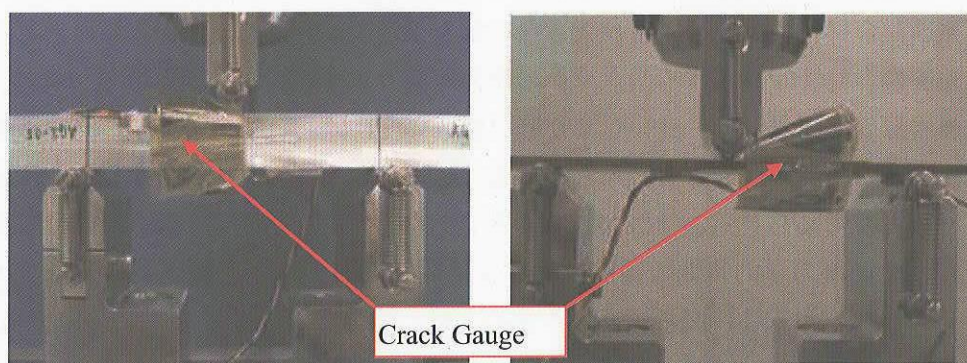


Fig.2 ENF testing for Aluminum-AF163-2K and CFRP-AF163-2K bond joints

### 3. 評価試験結果について

JIS規格(JIS K 7086)に基づき、CFRP接着構造とアルミ接着構造におけるせん断モードの破壊靱性値を次式(1)と式(2)によって算出できる。

$$\alpha_1 = \left[ \frac{C_1}{C_0} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_1}{C_0} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$G_{IIC} = \frac{9\alpha_1^2 P_C^2 C_1}{2B(2L^3 + 3\alpha_1^3)} \quad (2)$$

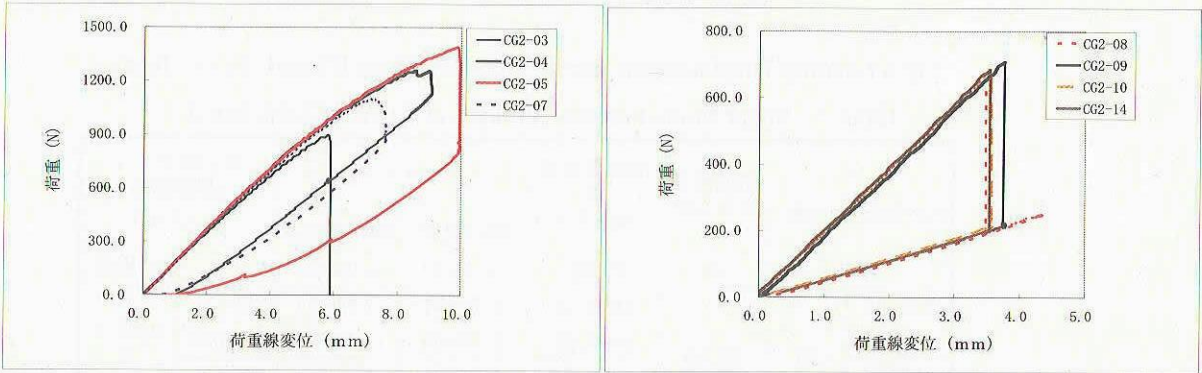
ここに、 $G_{IIC}$ : き裂進展初期のモードII破壊靱性値 (kJ/m<sup>2</sup>) ;



$a_0$  : 初期き裂長さ (mm) ;  $P_c$  : 初期限界荷重 (N) ;  
 $C_1$  : 初期限界荷重における荷重点コンプライアンス (mm/N) ;  
 $C_0$  : 初期の弾性部分の荷重点コンプライアンス (mm/N) ;  
 $\alpha_1$  : 初期限界荷重におけるき裂長さの推定値 (mm) ;  
 $L$  : 荷重点と支持点の間の距離 (mm) ;  $B$  : 試験片幅 (mm)

3.1 CFRP 接着構造の評価試験結果

図3に常温(3a)と極低温度(3b)で実施した ENF 試験で得られた CFRP 接着構造の荷重－荷重線変位結果を示す。これらの試験データから初期限界荷重 ( $P_c$ )、初期限界荷重における荷重点コンプライアンス ( $C_1$ ) と初期弾性挙動における荷重点コンプライアンス ( $C_0$ ) を算出し、式 (1) と (2) に代入して得られた CFRP 接着構造のせん断モード破壊靱性値の結果を表2に示す。図3bに示す極低温度での荷重－荷重線変位結果から見られるように、最大破断荷重まで弾性挙動を示したため、JIS 規格に基づき初期限界荷重に最大荷重を用いた。この表に示す結果から極低温度で CFRP 接着構造のせん断モード破壊靱性は常温結果の約 46%までに低下したことが判明した。



RT -163°C  
Fig.3 Loading-Displacement Curves Obtained at RT and -163°C Testing

Table 2 Shear Mode Fracture Strength ofCFRP-AF163-2K Bond

供試体No.	温度	初期亀裂長さ (mm)	初期限界荷重 (5%OFFSET)	コンプライアンス		せん断破壊靱性 $G_{II}$ (J/m <sup>2</sup> )	
		a0	Pc (N)	弾性範囲 $C_0$ (mm/N)	限界荷重点 $C_1$ (mm/N)		平均値
	CG2-03	RT	20.00	898.06	5.7E-03	6.1E-03	2256.1
CG2-04	1041.85			5.7E-03	6.0E-03	2975.7	
CG2-05	904.45			5.5E-03	5.8E-03	2196.5	
CG2-07	967.16			5.8E-03	6.1E-03	2628.9	
供試体No.	温度	初期亀裂長さ (mm)	初期限界荷重 (最大荷重)	コンプライアンス		せん断破壊靱性 $G_{II}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	
		a0	Pc (N)	弾性範囲 $C_0$ (mm/N)	限界荷重点 $C_1$ (mm/N)		平均値
	CG2-08	-163℃	20.00	657.80	4.9E-03	5.3E-03	1149.6
CG2-09	708.34			5.8E-03	5.3E-03	1326.0	
CG2-10	685.63			5.0E-03	5.2E-03	995.8	
CG2-14	684.90			4.9E-03	5.2E-03	1159.8	

3.2 アルミ接着構造の評価試験結果

図4に常温と極低温度で実施したアルミ接着構造のENF評価試験で得られた荷重－荷重線変位結



果を示す（実線は極低温度結果）。CFRP接着構造の場合と同様、これらの試験データから初期限界荷重（ $P_c$ ）、初期限界荷重における荷重点コンプライアンス（ $C_1$ ）と初期弾性挙動における荷重点コンプライアンス（ $C_0$ ）を算出し、式(1)と(2)に代入して得られたアルミ接着構造のせん断モード破壊靱性値結果を表3に示す。この表に示す結果から極低温度でアルミ接着構造のせん断モード破壊靱性は常温結果の約60%までに低下したことが判明した。

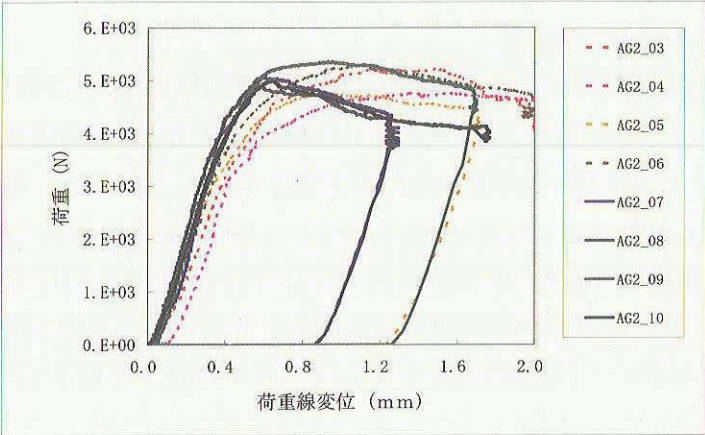


Fig.4 Loading-Displacement Curves Obtained From RT and -163°C Testing

Table 3 Shear Mode Fracture Strength of Al-AF163-2K Bond

供試体No.	温度	初期亀裂長さ (mm)	初期限界荷重 (5%OFFSET) $P_c$ (N)	コンプライアンス		せん断モード破壊靱性 $G_{II}$ (J/m <sup>2</sup> )	
				弾性範囲 $C_0$ (mm/N)	限界荷重点 $C_1$ (mm/N)		
		$a_0$					平均値
AG2-03	RT	25.00	4669.11	1.5E-04	1.6E-04	2634.6	2247.1 ± 271.3
AG2-04			4099.62	1.6E-04	1.7E-04	2176.0	
AG2-05			4289.44	1.3E-04	1.4E-04	2000.8	
AG2-06			4600.17	1.3E-04	1.3E-04	2177.2	
AG2-07	-163°C	25.00	4131.36	9.8E-05	1.0E-04	1366.2	1366.2 ± 197.9
AG2-08			4220.60	8.9E-05	9.4E-05	1304.8	
AG2-09			4551.34	1.0E-04	1.1E-04	1743.4	
AG2-10			4150.52	9.8E-05	1.0E-04	1392.1	

4. まとめ

CFRP 接着構造とアルミ接着構造を別に実施した引張モード（15 年度で実施）とせん断モードの破壊力学的特性評価試験から下記の結果が得られた：

- ・ 極低温度で CFRP/アルミ複合接着構造の引張モード破壊強度特性は常温結果の 54%より低い
  - ・ 極低温度で CFRP/アルミ複合接着構造のせん断モード破壊強度特性は常温結果の 60%より低い
- 上記の実験結果から得られた結論として、CFRP/アルミ間接着構造の破壊強度特性をより正確に把握するため、CFRP 接着構造の破壊力学的特性の温度依存性変化を見極めるのが最も重要がある。これはアルミ/接着剤より、CFRP/接着剤間の熱線膨張率ミスマッチの方が大きいいため、広い温度範囲の変化に伴い CFRP 接着構造に発生する熱ひずみ・応力も大きくなるため、温度の低下から接着構造に与える影響も大きくなったことが考えられる。

謝辞：共同研究で東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学の青木隆平教授に有益な助言をしていただいたことにお礼を記す。